

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Christiansen, Hermann; Kirby, Robert

Verminderung von Sedimentation in Hafenbecken

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtkongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104857>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Christiansen, Hermann; Kirby, Robert (2002): Verminderung von Sedimentation in Hafenbecken. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 30. Internationaler Schifffahrtkongress; Sydney, Australien, 22. - 26. September 2002. Bonn: PIANC Deutschland. S. 62-72.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Baggerungen und Handhabung von Baggergutmaterialien

Verminderung von Sedimentation in Hafenbecken

Robert Kirby
Ravensrodd Consultants Ltd.

Dr.-Ing. Hermann Christiansen,
Strom- und Hafenbau Hamburg

1. Zusammenfassung

Bei Hafenbecken an sedimentreichen Gewässern, gibt es bei der Festlegung der erforderlichen Einfahrtsbreite seit langem einen Interessenkonflikt: Einerseits benötigt man eine möglichst breite Zufahrt, damit Schiffe sicher einlaufen können, andererseits sollte die Öffnung möglichst klein sein, um den Eintrag von Sedimenten und damit den ständigen Aufwand für Unterhaltungsbaggerungen gering zu halten.

Zur Entschärfung dieses Interessenkonfliktes wird ein System vorgestellt, bei dem mit konstruktiven Maßnahmen die „Strömungsverhältnisse“ verändert werden. Die veränderten Strömungen führen zu einer deutlichen Sedimentationsverminderung und begünstigen außerdem die Schiffsmanöver, so daß geringfügige räumliche Einschränkungen infolge dieser Maßnahmen kompensiert werden können. Im Englischen werden diese Maßnahmen sehr treffend als „Entrance Flow Optimisation Structures = EFOS“ bezeichnet. Diese Maßnahmen zur Optimierung der Strömungen an Hafeneinfahrten bestehen im Kern aus einer Strömungsumlenkwand (Current Deflecting Wall = CDW) sowie Grundschwellen bzw. Bermen außerhalb der Hafeneinfahrt. Es handelt sich hierbei nicht um Vertiefungs- sondern um „Anti-Verlandungs-Vorrichtungen.“

Beispielhaft wird über Erfahrungen berichtet, die über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren mit einer CDW am Köhlfleet im Süßwasser-Tidegebiet der Elbe, im Hamburger Hafen gewonnen wurden. Die Sedimentation im gesamten Köhlfleet verminderte sich um mehr als 40%, ohne dass Sedimentationsanreicherungen an anderer Stelle festzustellen waren.

In den vergangenen Jahren wurden mit EU-Mitteln unterstützte Forschungsprojekte bei Delft Hydraulics durchgeführt, mit dem Ziel, die Physik der Strömungsverhältnisse bei der Verwendung von EFOS/CDW-Vorrichtungen genauer zu unter-

suchen. Diese Forschungen wurden jüngst dahingehend erweitert, dass Hafenbecken in Brackwasserbereichen mit einbezogen wurden. Modifizierte EFOS/CDW-Systeme haben sich auch dabei sehr gut bewährt.

Da die Sedimentation in Hafenbecken dieser Regionen, in denen sich Salz- und Süßwasser mischen, oft um eine Größenordnung höher sind als im reinen Süßwasser-Tidegebiet, haben Beiträge zur Sedimentationsverminderung hier eine noch höhere wirtschaftliche Bedeutung.

Für einige Häfen können sich durch EFOS/CDW-Systeme auch neue Perspektiven zukünftiger Entwicklungen eröffnen. Gemeint sind Häfen mit derzeit abgeschleusten Hafenbecken, die zwar weniger Sedimentationsprobleme aufweisen, dafür aber einen Wettbewerbsnachteil haben, wegen der zeitaufwendigeren Schiffsabfertigung infolge zweifacher Schleusungsvorgänge. Der Bau neuer, tideoffener, „schnellerer Hafenbecken“ kann sich heute für diese Standorte rechnen, wenn es gelingt, die hohen Unterhaltungsaufwendungen für Baggerungen durch Minderungsmaßnahmen drastisch zu reduzieren.

EFOS/CDW-Systeme können an bestehenden Hafeneinfahrten in der Regel nachgerüstet werden. Ideal sind natürlich die Verhältnisse bei neu anzulegenden Becken, weil es dann möglich ist, Einfahrtsgometrie und EFOS/CDW System bereits in der Planungsphase aufeinander abzustimmen.

Verminderungen von Sedimentablagerungen „am Ort“ leisten auch einen wichtigen Beitrag für die Fernwirkung dadurch, dass sie dem natürlichen Sedimenttransport im Gewässer, so wenig wie möglich an Material entziehen. Im Rahmen des integrierten Küstenzonen Management spielt dieser Gesichtspunkt besonders bei erosionsgefährdeten Küstenbereichen eine wichtige Rolle.

Nach den Ergebnisse mit der Umlenk wand der „ersten Generation“ am Köhlfleet, führten jetzt Weiterentwicklungen an Modellen zu noch leistungsfähigeren Vorrichtungen der „zweiten Generation“. Entscheidende Beiträge haben dabei neben weiterführenden wissenschaftlichen Erkenntnissen, vor allem auch neueste Untersuchungstechniken bei den hydraulischen Modellversuchen in Delft geliefert.

2. Einleitung

Seit dem es Häfen mit den entsprechenden Zufahrten an sedimentreichen Gewässern gibt, werden Versuche unternommen Ablagerungen von Sand und Schlick möglichst gering zu halten. Die bisherigen Ergebnisse waren meist wenig erfolgreich.

Durch den zunehmenden Tiefgang von Tankern, Massengutfrachtern und Containerschiffen und die entsprechenden Anpassungen der Fahrwasserhältnisse in den Häfen und Zufahrten haben sich auch die Sedimentationsmengen in der Regel weiter erhöht. Da Unterhaltungsbaggerungen mit fortschreitender Entwicklung der Baggertechnologie über lange Zeit zunächst noch finanziell beherrschbare Verhältnisse brachte, hat jedoch nach der Feststellung, dass Baggergut vielfach zu stark kontaminiert ist, das Problem der Baggergutunterbringung die gesamte Situation deutlich verschärft. Damit verstärkte sich der Druck, Technologien zur Minimierung des notwendigen Ausbaggerns zu entwickeln, um Kosten einzusparen und gleichzeitig Umweltbelastungen möglichst gering zu halten.

Bei Fahrrinnen in schwebstoffreichen und schlackigen Gewässern hat die Anwendung des Konzeptes der nautischen Tiefe (Kirby & Parker 1974; Kirby, Parker & van Oostrum 1980) erhebliche Kostenersparnisse gebracht. In Hafenbecken an Gewässern mit geringerer Trübung haben sich Bauwerke zur Optimierung der Strömungsverhältnisse im Zufahrtsbereich (EFOS) bewährt, und können zukünftig verstärkt eingesetzt werden.

Zu einem EFOS-System gehören Strömungsumlenkwände und Grundschwellen oder Bermen, die den Austausch von Wasser und Sedimenten im Beckenzufahrtsbereich minimieren.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen mit dem Betrieb von EFOS. Es soll herausgestellt werden, dass die beschriebenen Vorrichtungen die Vorteile besitzen, passiv und quasi im Dauerbetrieb zu funktionieren, den Aufwand an Unterhaltungsbaggerungen und der damit verbundenen Entsorgung erheblich zu reduzieren und dabei insgesamt die Umwelt deutlich zu schonen.

Hafenbecken entstehen z.B. durch den Bau von Wellenbrechern, die von der Küste aus in die See hinausragen, oder etwa dadurch, dass sie als seitliche Abzweigungen von Flüssen oder Tidekanälen künstlich ausgebaggt werden.

Von Beginn an, ob es sich nun um den Hafen Alexandria in Ägypten oder um noch frühere Bauwerke handelt, stellte an sedimentreichem Gewässer die Hafenzufahrt einen „Interessenskonflikt“ dar. Die Zufahrt sollte einerseits weit genug sein, um die gefahrlose Durchfahrt der Schiffe zu erlauben, andererseits brachte jede zu breite Zufahrt in Gewässern mit vielen Schwebstoffen eine Zunahme des Sedimenteintrages mit sich und damit dessen Ablagerung in den ruhigeren Gewässerzonen des Hafens. Im Laufe der Zeit, insbesondere in den letzten Jahrzehnten, wurde durch verschiedene Maßnahmen versucht, den Sedimenteintrag in Häfen zu verringern, allerdings mit bislang sehr mäßigem Erfolg (Röhr 1934; Vollmers 1963; Jenkins 1987; Krone 1987; Müller & Schwarze 1987).

Wie der Name schon sagt, beruht das Wirkungsprinzip der EFOS/CDW darauf, die natürlichen Strömungsverhältnisse so zu nutzen, dass der gewünschte Effekt einer Sedimentationsverminderung durch Verminderung der Austauschprozesse erreicht wird. Im Allgemeinen kennt man drei Hauptmechanismen, die den Austausch von Wasser und Sedimenten im Zufahrtsbereich zu abzweigenden Beckens bewirken (s. Abb. 1):

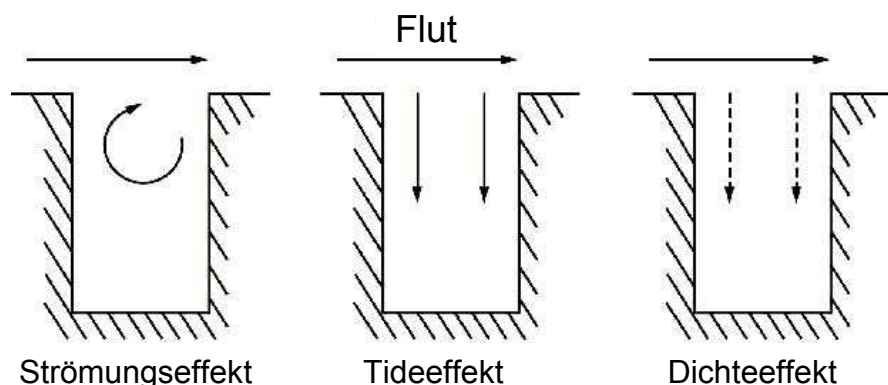


Abb. 1: Austauschprozesse zwischen Gewässer und Hafenbecken

Der Strömungseffekt allein kommt nur in einseitig gerichteten Flußsystemen vor. Strömungs- und Tideeffekt treten in Gezeitengewässern mit homogenem Wasserkörper auf d.h. in reinem Süß- oder Salzwasser. Alle drei Austauschvorgänge finden in nicht- homogenen Wasserkörpern statt, wie z.B. im unteren Brackwasser- Abschnitt eines Ästuars, wo sich Salz- und Süßwasser mischen. Viele der größten Häfen der Welt liegen in genau dieser Zone. Neben dem starken Austausch aufgrund des unterschiedlichen Salzgehalts, können auch unterschiedliche Trübung oder entsprechende Temperaturdifferenzen die unter Nr.3 aufgeführten Effekte hervorrufen.

Man hat nun festgestellt (Christiansen & Kirby 1991; Christiansen 1997; Crowder u.a. 1999; Kirby, Christiansen & Smith 1999; Smith Kirby & Christiansen 2000; Crowder u.a., in Vorbereitung), dass sich EFOS-Systeme für alle Hafenbecken eignen, an denen einer oder mehrere der o.a. Effekte auftreten, wobei die Anordnung der einzelnen EFOS-Elemente natürlich jeweils verschieden ist. Derzeit sind die Vorrichtungen insbesondere dort wirtschaftlich sinnvoll, wo durch das Baggern und die Baggergutbehandlung und Unterbringung von z.T. kontaminierten Sedimenten hohe Kosten entstehen. Das ist überwiegend in großen Häfen gegeben. Hier rentieren sich EFOS/CDW- Systeme einschließlich der Kosten für die Voruntersuchungen (z.B. Modellversuche) sehr schnell. Für kleinere Häfen, z.B. Yachthäfen, bei denen die Voruntersuchungskosten bereits einen wesentlichen Anteil ausmachen, wird gegenwärtig untersucht, preisgünstigere Verfahren zu entwickeln.

Bisher zeigten sich zwei Anwendungsbereiche für das EFOS- System. Der häufigste Fall ist der nachträgliche Einbau im Zufahrtsbereich eines bestehenden Beckens. Dies ist nach Prüfung der Randbedingungen grundsätzlich möglich, egal ob einer, zwei oder alle drei der o. g. Austauschmechanismen vorhanden sind. In Anbetracht der beinahe unerschöpflichen Vielfalt der Beckenzufahrten müssen die Vorrichtungen jedoch individuell auf die Strömungsverhältnisse in

den jeweiligen Einfahrtsbereichen abgestimmt werden.

Entsprechend einfacher ist natürlich die Situation beim Bau eines neuen Hafenbeckens, wenn das EFOS- System von Anfang an mit eingeplant werden kann. Die Anordnung einer CDW und die geometrische Ausformung der gegenüberliegenden Hafeneinfahrtsseite können dann bei verringertem Kostenaufwand für die Herstellung gleich optimal aufeinander abgestimmt werden.

Eine zusätzliche, unvorhergesehene Anwendung zeichnet sich möglicherweise an Standorten ab, wo aufgrund großer Tidehübe und starker Sedimentbelastung, Hafenbecken in der Vergangenheit hinter Schleusen angeordnet wurden. Infolge des schärferen Wettbewerbs beginnen die Hafenbetreiber nun auch dort über „zeiteinsparende“ Alternativen nachzudenken und tideoffene Hafenbecken anzulegen. Früher war man der Meinung, dass es keinen Sinn mache, Tidebecken an solchen Standorten zu errichten, da sie ohne häufige Ausbaggerung zwangsläufig schnell verlanden würden. Baut man jedoch ein Tidebecken mit optimierter Zufahrt, bei der die Unterhaltungsaufwendungen im finanziell beherrschbaren Rahmen bleiben, so kann der gewonnene Zeitvorteil durch schnellere Schiffsabfertigung den Ausschlag für eine Realisierung geben.

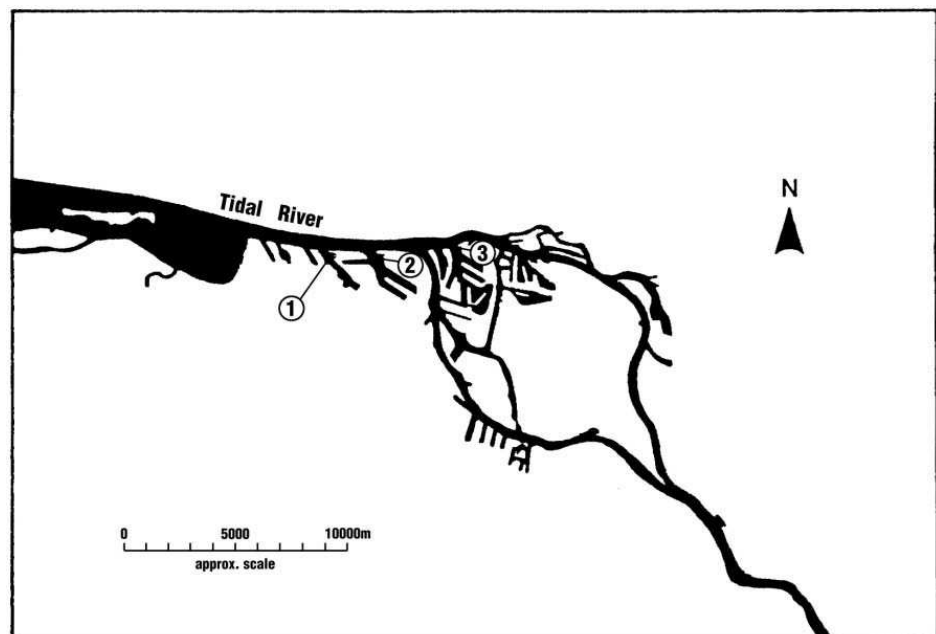


Abb. 2: Der Hamburger Hafen mit den drei größten Hafenbecken (1) Köhlfleet (2) Parkhafen und (3) Vorhafen

3. Bisherige Ergebnisse

3.1 Erfahrungen in Hamburg (Tide, Süßwasser)

Die Elbe bei Hamburg weist Schwebstoffkonzentrationen auf, die i.M. bei rd 100mg/l liegen. Das Fahrwasser besteht aus Sand. Feines, schlickreiches Sediment findet sich in Ablagerungsbereichen, die durch die angelegten Hafenbecken gebildet werden (Abb. 2).

Aufgrund der in Hamburg auftretenden Strömungs- und Tideeffekte setzen sich bis zu 80% des gesamten Feinsedimenteintrags im Zufahrtsbereich der Becken ab und bilden dort sogenannte „Linsen“ (Abb. 3).

Durch die hohen Sedimentationsraten ergeben sich entsprechend hohe Ablagerungsmengen (Tab. 1).

Da der Hafenschlick z.T. immer noch zu stark kontaminiert ist, muss ein entsprechender Anteil des Baggergutes aufbereitet und an Land entsorgt werden. Folglich stellt dies hohe und unvermeidbare Fixkosten für den Hafenbetreiber dar.

Die erste Strömungsumlenkwand wurde im Hamburger Hafen als Prototyp an der Zufahrt zum Köhlfleet zwischen August und November 1990 gebaut. Hamburg ist in dreierlei Hinsicht der ideale Testort:

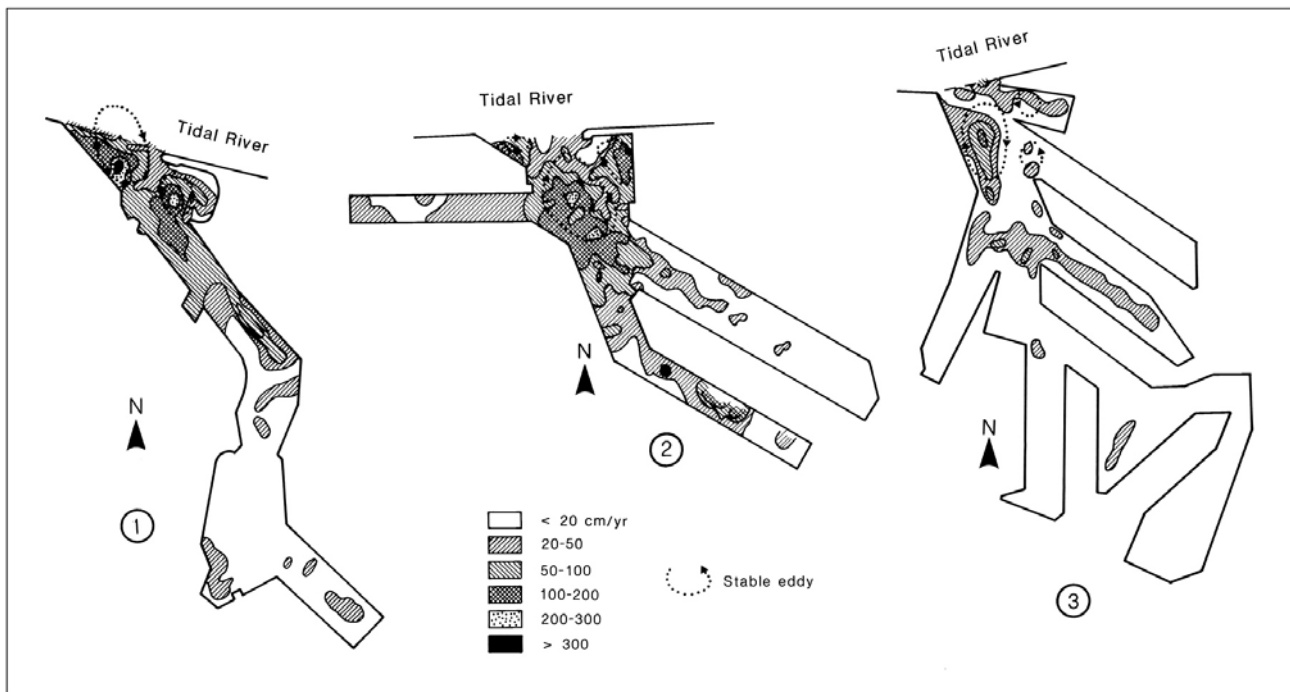


Abb. 3: Mittlere jährliche Sedimentation in (cm/a) von 1979 bis 1984 in den 3 größten Hafenbecken in Hamburg. Lage von Strömungswalzen und Sedimentlinsen in den Einfahrten. Vor Bau der Umlenk wand betrug die max. Sedimentation in der Einfahrt zum Köhlfleet (1) > 3m/a.

1. Das Elbwasser ist im Bereich des Hamburger Hafens zwar den Gezeiten ausgesetzt aber dennoch Süßwasser. Daher speisen sich die Sedimenteintrags- Mechanismen allein aus den zwei Effekten von Strömung und Tide - eine relativ einfache Situation.

Tabelle 1 Hafen Hamburg Mittlere Sedimentation und gemessenen bzw. erwartete Verminderung beim Einsatz von EFOS/CDW-Systemen		
Standort	Mittlere Verlandung x 1000 m³/Jahr Ist	Mittlere Reduzierung x 1000 m³/Jahr Gemessen / erwartet
Köhlfleet	350 (vor 1990)	140 (seit 1991, gemessen)
Parkhafen	450 (1991-1995)	180 (erwartet)
Vorhafen (ohne Zuschüttung des Vulkanhafens in 1997)	570 (1991-1995)	230 (erwartet)
Sandauhafen	140 (1991-1995)	60 (erwartet)

2. Der Hamburger Hafen verfügt über zahlreiche Hafenbecken. Wenn eines davon in der Absicht verändert wird, die Verlandungsrate zu beeinflussen, so gibt es genug andere Becken in unterschiedlicher Entfernung vom Testort, die für „Kontrollzwecke“ herangezogen werden können.

Entfernung vom Ufer der westlichen Einfahrtsseite angeordnet ist (Abb. 4).

Ufer und Wand bilden dadurch einen Kanal. Dort wo der Flutstrom in den Kanal eintritt (auf Abb. 4 von links her), ist eine bogenförmige Unterwasserschwelle von 3m Höhe angeordnet.

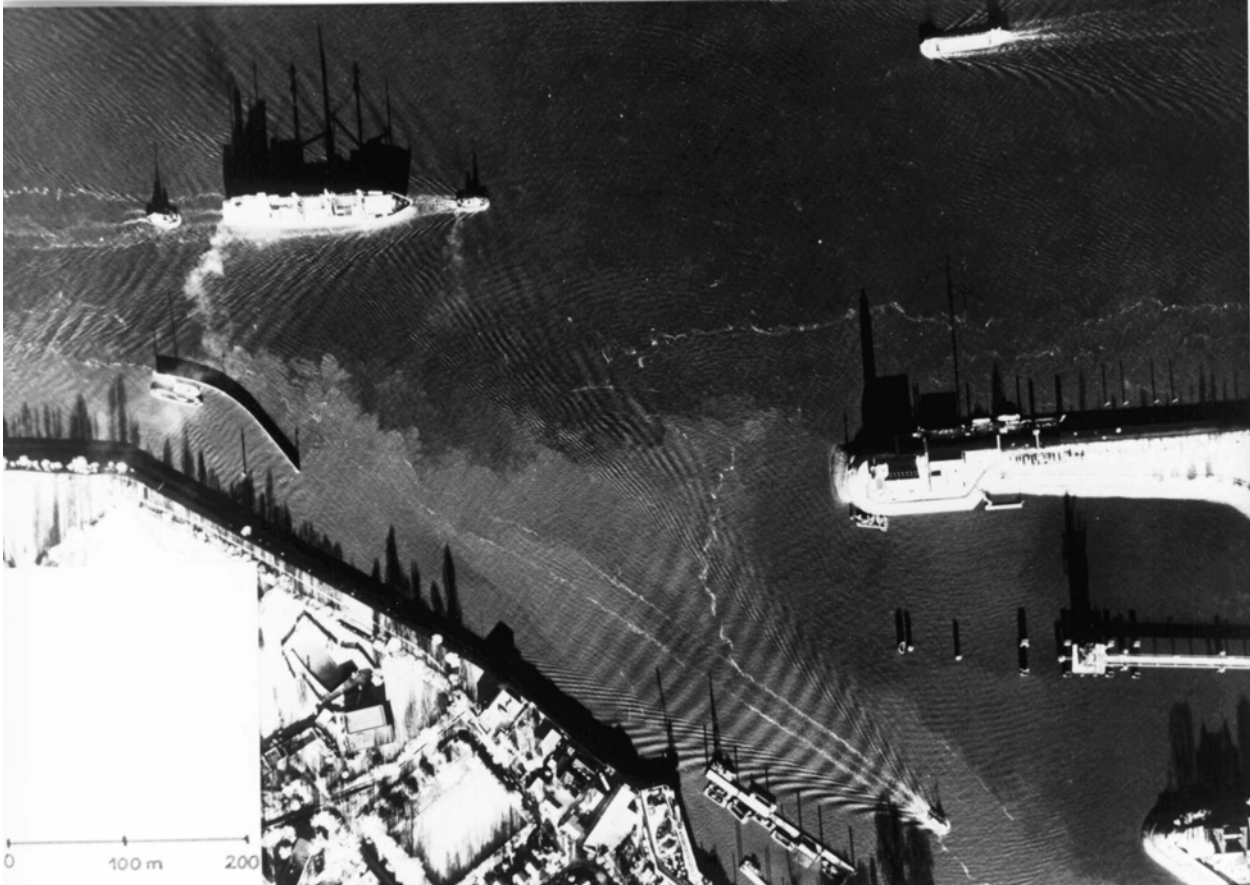


Abb. 4: Strömungsumlenkwand (CDW) am Köhlfleet nach Fertigstellung im Dez. 1990

3. Es gibt langjährige und gute Erkenntnisse über das Sedimentationsverhalten im Hafen. Die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Oberwasserführung der Elbe und den Sedimentationsraten in den Hamburger Hafenbecken war in diesem Zusammenhang sehr hilfreich, um bei den sehr unterschiedlichen Oberwasserabflüssen in der Elbe nach 1990 die Sedimentationsverminderungen durch die Umlenk wand jeweils richtig zuordnen zu können.

Die Umlenk wand am Köhlfleet besteht aus einer 150 m langen, gebogenen Wand, die in etwa 70m

Der Prototyp wurde zunächst zwecks zweijähriger Erprobung installiert, wobei nicht ausgeschlossen war, dass evtl. eine ähnliche Vorrichtung zu einem späteren Zeitpunkt an der der Ebbe zugewandten Ecke des Beckens (flussaufwärts) benötigt würde. Dies war, wie sich dann später ergab, jedoch nicht notwendig.

Nach Einbau der Umlenk wand wurden die Nah- und Fernwirkungen laufend überwacht und detailliert protokolliert. Durch die lange Beobachtungsdauer wurde auch erreicht, dass ein breites Spektrum unterschiedlicher Oberwasserabflüsse der Elbe erfaßt wurden, die ja sehr unterschiedlichen Einfluß auf das Sedimentationsgeschehen

im Hamburger Hafen haben. Dabei zeigte sich, dass im Jahresmittel die Verlandungs- und damit Baggermengen im Vergleich mit der Zeit vor Bau der Umlenkwand um 45% geringer ausfielen (140.000 m³/Jahr; s. Abb. 5). Im Verlauf der Jahre stellte sich auch heraus, dass die Sedimentationsverminderung im Köhlfleet nicht zu Lasten entsprechender Sedimentationserhöhungen an anderer Stelle, z. B. in anderen Hafenbecken, gegangen ist. Das liegt vor allem daran, dass im natürlichen Sedimenttransportgeschehen der Elbe, die Verminderungsmenge im Köhlfleet letztlich nur einen Anteil von 0,3% ausmacht und ein solch geringer Anteil als Zusatzbelastung an anderer Stelle nicht nachweisbar ist.

Aufbauend auf diesem Erfolg soll die nächste Strömungsumlenkwand am Parkhafen installiert werden, dem wichtigsten Hafenbecken für den Containerumschlag in Hamburg. Nach umfangreichen Modellversuchen bei Delft Hydraulics wird es jedoch eine fortentwickelte Konstruktion der sogenannten zweiten Generation sein. Sie wird aus zwei versetzt zueinander angeordneten, strömungstechnisch sehr harmonisch geformten Elementen bestehen. Das insgesamt verbesserte Wirkungsprinzip dieser Wandtyps beruht darauf, die Strömungsumlenkung möglichst ohne Ablösungserscheinungen an der Wand und Turbulenzen hinter der Wand im Bereich der Hafeneinfahrt zu realisieren.

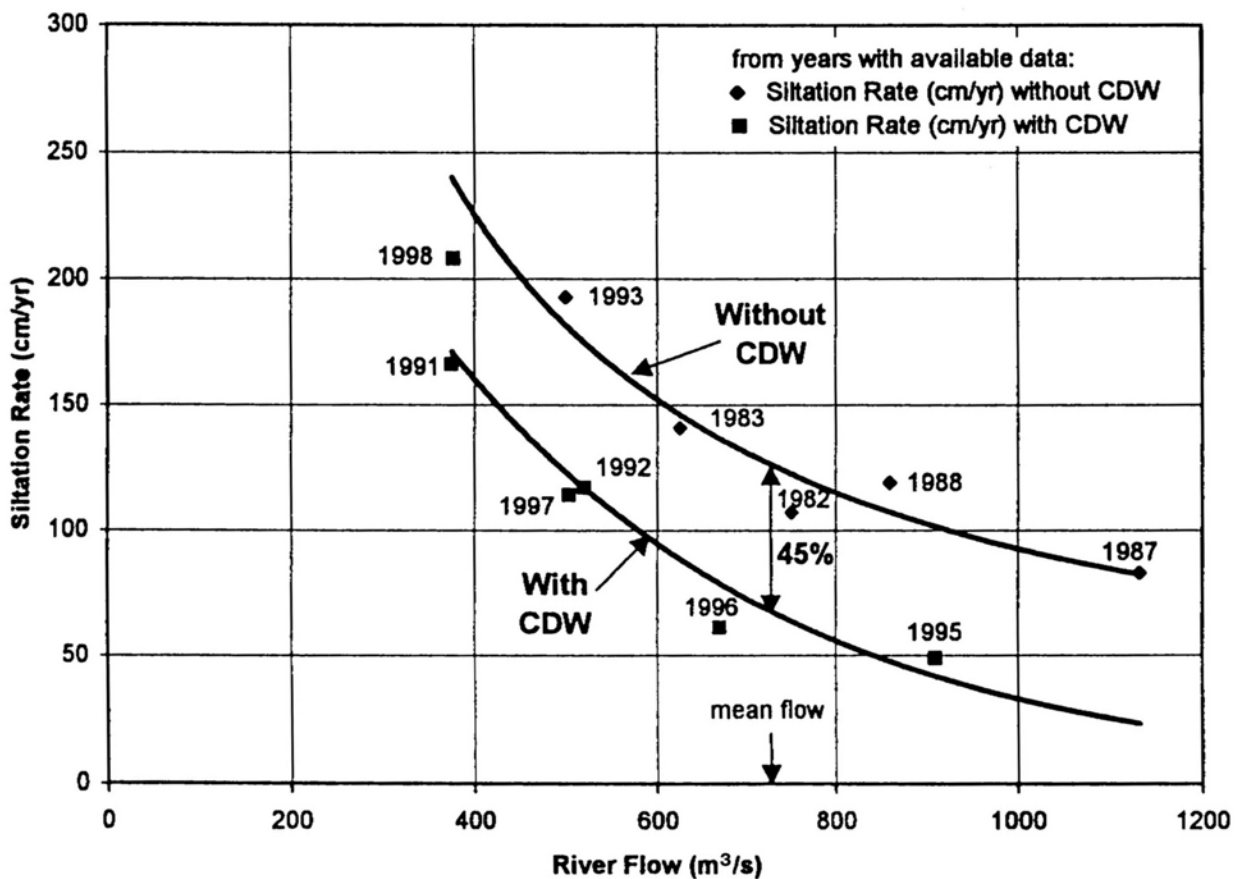


Abb. 5: Sedimentation im Köhlfleet in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß der Elbe, vor und nach Bau der Umlenkwand; Verminderung i.M. 45%. Höchste Sedimentationsraten bei geringem Abfluß als Folge der sich stromauf verlagernden Trübungszone.

Eine ausführliche Beschreibung der vorgesehenen Umlenkwand am Parkhafen ist Gegenstand einer gesonderten, in Vorbereitung befindlichen Veröffentlichung.

3.2 Modellversuche für Brackwasserverhältnisse (Tide, Salz-/ Süßwasser)

In letzter Zeit wurde eine Hauptfrage zunehmend wichtig für den Fortgang der Entwicklungen, nämlich ob EFOS auch für solche Häfen ähnliche Vorteile bringen können, die – wie in vielen Fällen – im Brackwasserbereich schlickreicher Tidegewässer liegen. Um dieser Frage nachzugehen, wurden die ersten EFOS/CDW- Untersuchungen dieser Art im Rahmen eines von der EU finanzierten Projekts LIP-III unternommen, und zwar im Tideströmungskanal für Salz- und Süßwasser bei Delft Hydraulics (Hofland, u.a., 2001).

Die Arbeiten zu diesem Forschungsprojekt wurden von Studenten der Technischen Universität Delft und der Universitäten Bradford und Cardiff unter der Leitung eines Expertenteams durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurde als Standard ein im 45-Grad Winkel zur Hauptströmung liegendes Hafenbecken betrachtet. Als denkbar ungünstigster Fall wurde darüber hinaus ein in der Vertikalen homogener Wasserkörper gewählt, dessen Salzgehalt jedoch ein Gefälle in Längsrichtung, d.h. über den zeitlichen Verlauf der Tide aufweist. Für den Fall, dass mit diesen Vorgaben keine deutliche Reduzierung des Austausches an der Gewässersohle erreicht würde, war geplant, mit weniger komplexen Randbedingungen zu experimentieren. Dies war jedoch letztlich nicht nötig.

Durchgeführt wurde eine streng kontrollierte Versuchsreihe, wobei jeweils nur ein Parameter pro Test geändert wurde, um die zweifelsfreie Feststellung von Ursache und Wirkung zu ermöglichen. Nach jeder Testkonfiguration wurde auch eine Wiederholungsreihe durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu garantieren. Es wurden drei Konfigurationen untersucht (Abb. 6). Die Bezugsanordnung (Konfiguration A) war ein Becken im 45-Grad Winkel, dessen stromaufwärtsgerichtete (Ebbe) Ecke abgeschrägt wurde. Nach langem Experimentieren ist es mit der Konfiguration

B gelungen, eine optimierte Form für die stromabwärtsgerichtete Ecke (Flut) zu entwickeln. Für die endgültigen Tests wurden dann letztlich beide Beckenecken optimiert (Konfiguration C) und die Wirkung in vollständigen Tidezyklen untersucht.

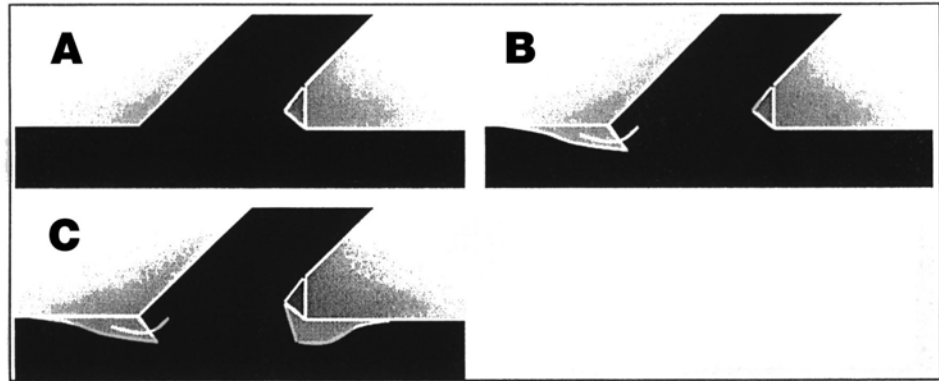


Abb. 6: Untersuchte Hafeneinfahrtsformen im Rahmen der EU geförderten LIP III Versuche in der Salz- Süßwasser- Tiderinne bei Delft Hydraulics. A zeigt die Ausgangssituation, B die Situation mit CDW und sohlnahm Stromabweiser am seeseitigen Ufer zur Hafeneinfahrt und C, die mit zusätzlichem sohlnahm Stromabweiser an der gegenüberliegenden Seite

Verschiedene Parameter wurden gemessen:

- Der Süßwasserzufluß in den Tideströmungskanal
- Die Wasserstände an 10 verschiedenen Orten entlang der Versuchsrinne und an 2 Stellen im abzweigenden Hafenbecken
- Die horizontale Fließgeschwindigkeit in zwei Richtungen an verschiedenen Stellen der Hafeneinfahrt mit entsprechenden Meßgeräten .
- Die Geschwindigkeit an der Oberfläche im Hafenmündungsbereich und im Hafen mit Hilfe der PTV- Technik (Particle Tracking Velocimetry).
- Die Leitfähigkeit und Temperatur im vertikalen Profil (wg. der Dichte) an verschiedenen Stellen entlang der Rinne und im Hafenbecken.
- Die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit in der Hafenmündung, an der Gewässersohle mittels kurzer Wollfäden und oben mit Schwimmkügelchen, die durch transparente

Fäden am Bett des Strömungskanals gehalten wurden.

- Der Wasseraustausch im maßgebenden sohlernen Bereich mit Hilfe injizierter Farbstoffe und eines besonderen optischen Verfahrens zur quantitativen Auswertung.

Unter Simulation von vollständigen Tidezyklen und dem Einsatz der oben beschriebenen Techniken wurden die Austauschvorgänge zwischen Versuchsrinne (Fluß) und abzweigendem Becken quantifiziert, wobei die Austauschvorgänge in der bodennahen Wasserschicht den Schwerpunkt bildeten (Abb. 7). Man geht bislang davon aus, dass dies wesentliche Hinweise dafür liefert, inwieweit sich eine Reduzierung des Sediment austausches im Zufahrtsbereich erreichen lässt (Crowder u.a. 1999; Kirby, Christiansen & Smith 1999). Es stellte sich heraus, dass eine vollkommen optimierte Zufahrt (Konfiguration C) die Austauschvorgänge zwischen Rinne und Becken um fast 90% reduzierte. Dies ist ablesbar an der Abnahme der Anfangssteigungen („tangent“) der Funktionen auf Abb. 7a (Konfiguration A) auf die, dargestellt auf Abb. 7c für die optimierte Konfiguration C. Diese enorm hohe Verminderung wurde durch verschiedene Wiederholungsversuche bestätigt.

Im Zeitraum um den Kenterpunkt nach Hochwasser reicht die Strömung nicht aus für die o.g. fast vollständige Unterbindung der Austauschvorgänge. In dieser Zeit ist der Austausch dann sogar leicht stärker als bei Konfiguration A. Da in Ästuarien diese Zeiträume nur von kurzer Dauer sind, schränkt dieser unerwünschte Nebeneffekt die zuvor beschriebenen Vorteile nur in kleinerem Umfang ein.

Die Ergebnisse der Modellversuche können als klarer Hinweis darauf gewertet werden, dass eine Reduzierung des Wasser- und Sediment austauschs bei entsprechender Optimierung der Beckenzufahrten (EFOS) möglich ist, und das bei allen drei im Abschnitt 2 genannten Austauschmechanismen. Dies gilt in gleicher Weise für bestehende als auch für neu anzulegende Hafenbecken, Schleusenzufahrten oder andere seitliche Abzweigungen.

4. Modelle und Messungen in der Natur

Bislang wurden alle Untersuchungen zur Optimierung von Hafenbeckeneinfahrten an maßstabsgetreuen physikalischen Modellen durchgeführt, wobei die LIP-III Versuche in einem Salzwasser-Strömungskanal stattfanden. Modelle dieser Art sind z.T. sehr kostenaufwendig und daher ein

Grund mit dafür, dass bisher in diesen Modellen nur „große Hafenbecken“ untersucht wurden, bei denen im Kosten- Nutzen- Vergleich, die Modellkosten von geringerer Bedeutung sind.

Man kann im physikalischen Modell die Strömungsverhältnisse optimieren und geht dann davon aus, dass der Sediment austausch entsprechend minimiert wird. Wünschenswert wäre es wenn zukünftig auch verwendbare mathematische Modelle zur Verfügung stünden, um neben den Strömungsverhältnissen auch die Sediment austauschvorgänge zu optimieren. Grundsätzlich ist das Arbeiten mit mathematischen Modellen preiswerter. In Zukunft könnte man auf diese Weise sowohl die Mengenreduzierung des Schlickeintrags in große Becken berechnen als auch Optimierungsuntersuchungen für kleine Häfen und Marinas durchführen.

Das immer noch lückenhafte Wissen um physikalische Abläufe beim Sedimenttransport und darüber hinaus der Umfang der zu bewältigenden Datenmengen zeigen die Grenzen der aktuellen Generation der mathematischen Modelle zur EFOS-Optimierung deutlich auf.

Sollte sich das in hoffentlich naher Zukunft ändern, könnte das mathematische Modell zum geeigneten Werkzeug der EFOS- Designer werden.

Messungen vor Ort sind ein wichtiger Bestandteil bei der Entwicklung von EFOS-Systemen. Beim Einsatz von physikalischen oder mathematischen Modellen müssen diese Modelle traditionell mit Hilfe von Meßdaten aus der Natur geeicht werden.

Messungen, ausgeführt mit modernen Techniken der Datenerhebung, haben aber darüber hinaus eine besondere Bedeutung. Sie geben einen unmittelbaren Einblick in die physikalischen Vorgänge in der Natur, real und ohne vereinfachende Einschränkungen, wie sie bei Modellen immer zwangsläufig erforderlich sind.

Besonders gut haben sich RDI ADCP- Messungen der Wasserbewegungen und des damit einhergehenden Sedimenttransports bewährt, die unter Verwendung der „Sediview“-Software während ganzer Tidezyklen durchgeführt wurden (Abb. 8, Smith, Kirby & Christiansen 2000). In wiederholten Durchläufen tastet das ADCP in voller Tiefe und Breite Strömungsprofile ab. Im Computer werden die gewonnenen Daten zu einem Querschnittsprofil der Sedimenttransportes zusammengesetzt. Die Daten können aber auch zur Abbildung der in Abhängigkeit von der Tiefe variierenden Schwebstoffkonzentration herangezogen werden. Zur Erfassung sehr hoher Kon-

Baggerungen und Handhabung von Baggergutmaterialien Verminderung von Sedimentation in Hafenbecken

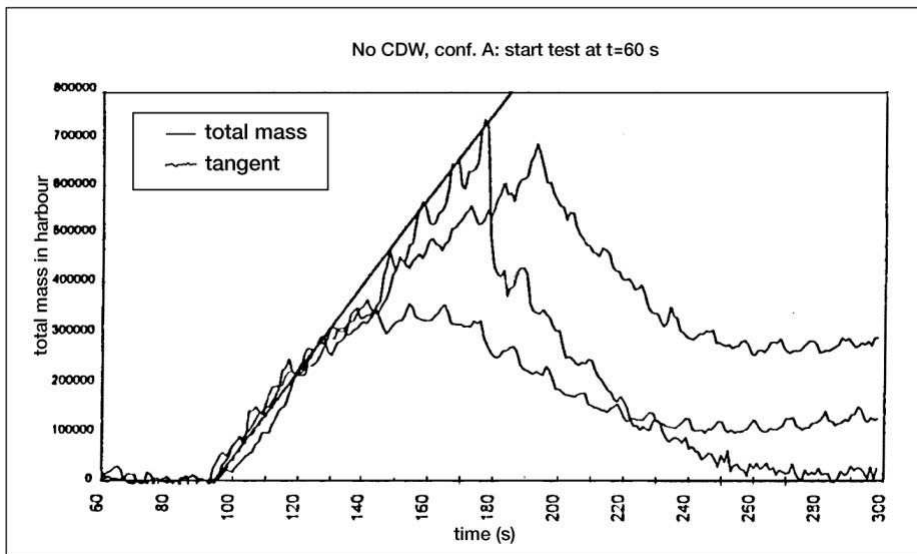


Abb. 7a:
Wasseraustausch
Tiderinne / Hafen-
becken beim Aus-
gangszustand **A**
(Digitalkamera-
Auswertungen von
Wasserfärbversu-
chen)
(3 Versuche)

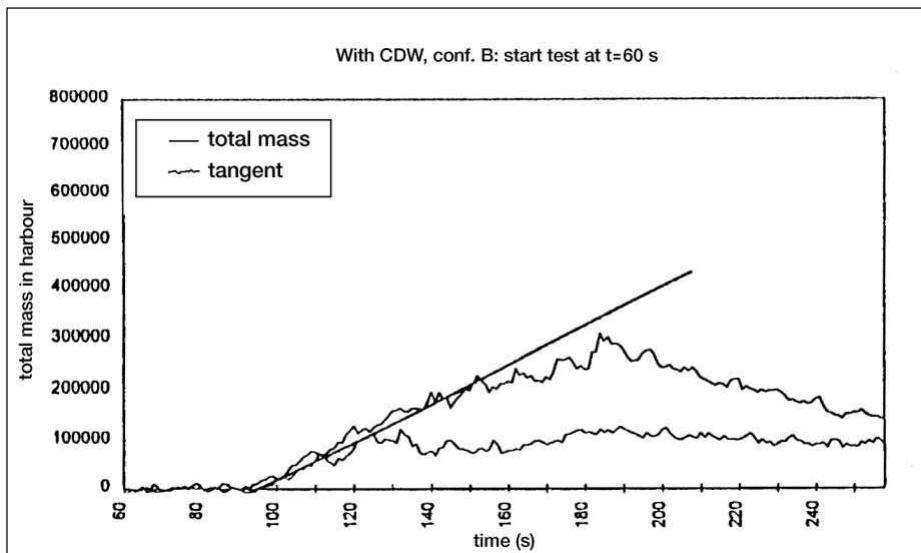


Abb. 7b:
Wasseraustausch
Tiderinne / Hafen-
becken für Konfigu-
ration **B**
(2 Versuche)

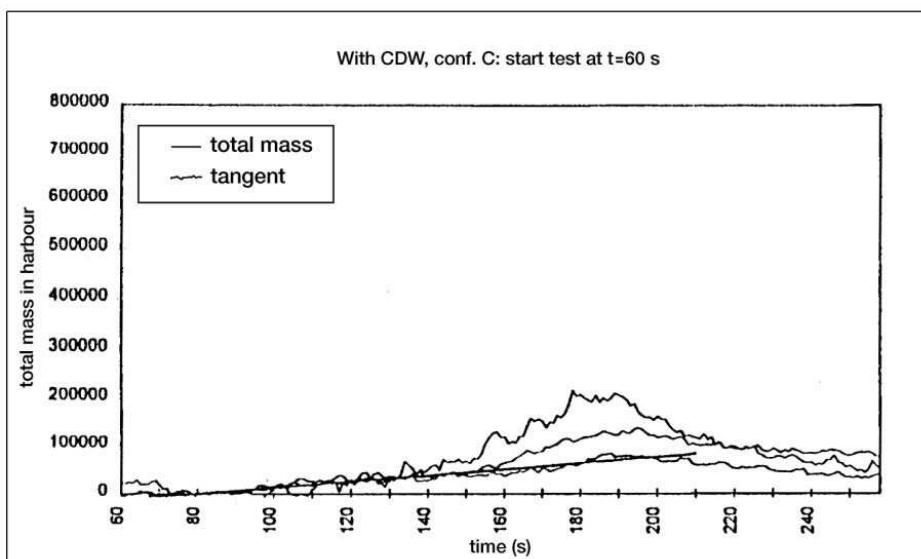


Abb. 7c:
Wasseraustausch
Tiderinne / Hafen-
becken für Konfigu-
ration **C** als optima-
les "EFOS"
(3 Versuche)

Abb. 7: Verminderung des Wasseraustausches durch EFOS gemäß Konfiguration C

zentrationen in Sohlhöhe, wie etwa Fluid Mud, ist ein besonderes Messgerät, das sog. „Siltmeter“ als Ergänzung zum ADCP mit Sediview entwickelt worden. Die Systeme werden zusammen eingesetzt (Land, Kirby & Massey 1997).

Für die drei Hauptmechanismen des Wasser- und Sediment austausches (Strömung, Tide, Dichte) sind Konstruktionskriterien für EFOS entwickelt worden.

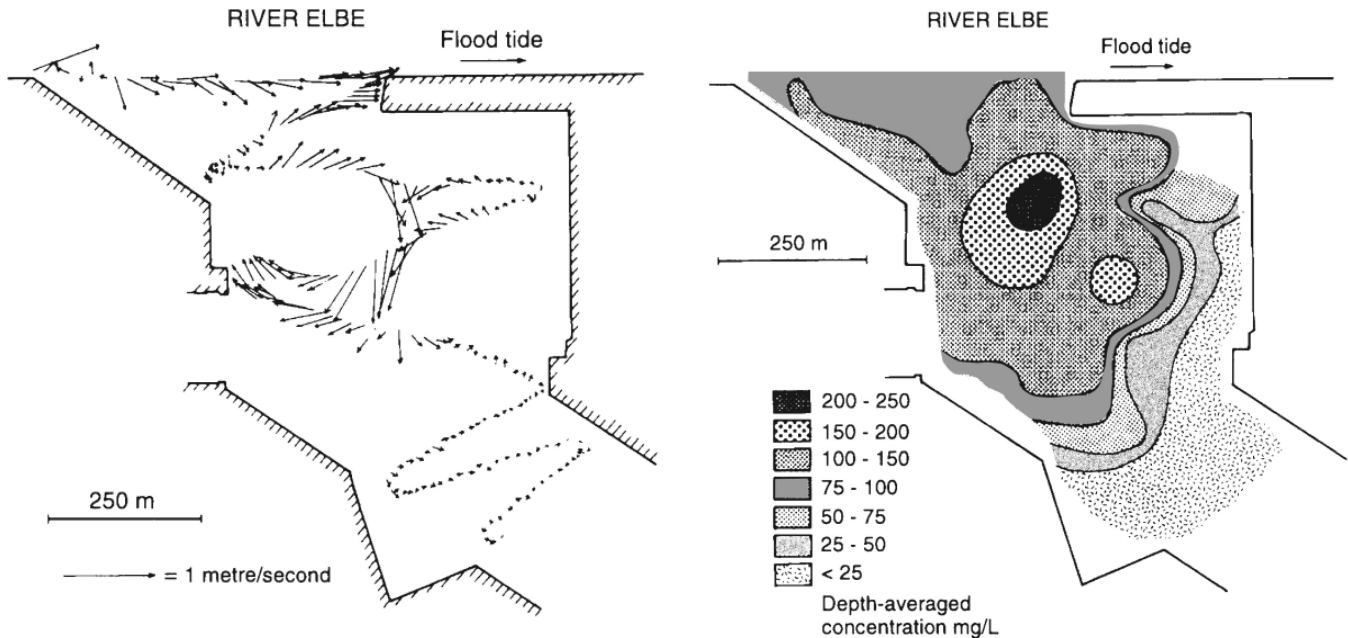


Abb. 8: Verteilung der Strömung und Schwebstoffkonzentration in der Einfahrt zum Parkhafen, Hamburg. Darstellung eines halbstündigen Zeitabschnitts aus einer Volltidemessung vom 21.10.1997 mit einem RDI- ADCP und Sediview- Auswertung der Fa. DRL, England

Erkenntnisse, die aus derart ausgewerteten Messungen gewonnen werden sind wichtig z.B. bei der Festlegung, wo der Eingang eines CDW- Kanals positioniert werden soll und wie hoch die Sohlschwelle sein muß, um möglichst wenig Sedimente in den Umlenkwandkanal eintreten zu lassen. Insofern ergänzen diese Daten die CDW- Optimierungsarbeiten an Modellen und sind ihnen gleichwertig.

5. Schlussfolgerungen

Seit Mitte der 80er Jahre sind die Systeme zur Optimierung der Strömungsverhältnisse im Zufahrtsbereich (EFOS), d.h. Strömungsumlenkwände, Bermen und Grundswellen, soweit entwickelt und verbessert worden, dass sie praktische bauliche Lösungen bieten. Es hat sich gezeigt, dass mit strömungsverändernden bzw. – optimierenden konstruktiven Maßnahmen erhebliche Verminderungen der Sedimentation in Hafenbecken erreicht werden können.

Die Systeme sind einsetzbar in bestehenden oder neu zu bauenden Hafenbecken oder Schleusenzufahrten an Flüssen, und im Tidegebiet bei Süßwasser-, Meereswasser- oder komplexen Brackwasserverhältnissen.

Das erste CDW-System wurde in einem Becken im Hamburger Hafen installiert, der mehrere Eigenschaften aufweist, die zur Entwicklung dieses grundlegend neuen Systems ideal waren. Eine zweite Wand wird in naher Zukunft gebaut. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass auch im Brackwasserbereich modifizierte Systeme einen wesentlichen Beitrag zur Sedimentationsverminderung liefern können.

Aller Voraussicht nach werden die gewonnenen Erfahrungen in Verbindung mit der weiteren technischen Entwicklung zu einsatzfähigen Vorrichtungen auch für kleine Häfen und Marinas führen. Zur Entwicklung dieses Sediment- Managementsystems zur Optimierung von Hafenbecken gehören naturgemäß nicht nur das eigentliche Konzept sondern auch die für den Entwurf notwendigen

Spezialtechnologien. Da die Vorrichtungen dauerhaft Vorteile bringen sollen, und zwar für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage, kommt dem sorgfältigen Entwurf eine wichtige Rolle zu. Die Planer tragen eine außerordentlich hohe Verantwortung bezüglich der Realisierung einer höchst effizienten Anordnung des EFOS.

6 Literatur

Christiansen H & Kirby R 1991 Fluid mud intrusion & evaluation of a passive device to reduce mud deposition. CEDA-PIANC Conference "Accessible Harbours" E1-E14.

Christiansen H 1997 Erfahrungen mit der Strömungsumlenkwand. Hansa. International Maritime Journal No 12, p70-73.

Crowder RA, Hofland B, van Leeuwen S, Kirby R, Christiansen H, Falconer RA, Smith TJ & Winterwerp JC 1999 Study of the design and operation of Current Deflecting Walls to reduce siltation in harbours. End-of-Programme Workshop LIP-III, Delft Hydraulics, p1-14.

Crowder RA, Smith TJ, Christiansen H, Winterwerp JC, Kirby R, Falconer RA & Schwarze H (in prep.) Flow control in the entrance to river harbours, embayments and irrigation canals. J. Hydraulic Research.

Hofland B, Christiansen H, Crowder RA, Kirby R, van Leeuwen CW & Winterwerp JC 2001 The Current Deflecting Wall in an estuarine harbour. Proc. XXIV Congress, Beijing.

Jenkins SA 1987 Passive remedial sedimentation control in parallel berths and channels. In: Sedimentation control to reduce maintenance dredging of navigational facilities in estuaries. National Academy of Sciences, Washington DC, p153-176.

Kirby R, Parker WR 1974 Seabed density measurements related to echo sounder records. Dock & Harbour Authority, Vol. LIV, No.641, p423-424.

Kirby R, Parker WR & van Oostrum WHA 1980 Definition of the seabed in navigation routes through mud areas. Int. Hydrographic Review, LVII (1), p107-117.

Kirby R, Christiansen H & Smith TJ 1999 Sediment Management Systems to Minimise Dredging Need. Transportation Research Board, Marine Transportation System R & D

Co-ordination Conference. Interagency Committee on Waterways Management. National Academy of Sciences, Washington DC, 11pp.

Krone RB 1987 Reducing sedimentation rates in harbour facilities. In: Sedimentation control to reduce maintenance dredging of navigational facilities in estuaries. National Academy of Sciences, Washington DC, p128-140.

Land JM, Kirby R & Massey JB 1997 Developments in the combined use of ADCPs and profiling siltmeters for suspended solids monitoring. Fourth Nearshore & Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference, "Intercoh 94", Chapter 12, p187-196. Eds. Burt N, Parker WR & Watts J. In: Cohesive Sediments, John Wiley & sons, 458pp.

Muller KD & Schwarze H 1987 Studies to reduce sedimentation in a port on a tidal river. Conference on Coastal & Estuarine Pollution. Kyushu University IAWPRC/JSWPR, p393-401.

Röhr F 1934 Wasser und Sinkstoff-Bewegungen in Fluss- und Seehäfen. Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe, 52pp.

Smith TJ, Kirby R & Christiansen H 2000 Entrance flow control to reduce siltation in tidal basins. Proceedings of Intercoh Conference 1998. Eds: W H McAnally & A J Mehta. In: Coastal & Estuarine Fine Sediment Transport Processes, Elseviers, pp. 459-484.

Vollmers H-J 1963 Systematik der Maßnahmen zur Verringerung der Schwebstoff-ablagerungen in Binnenhafenmündungen. Technische Hochschule Karlsruhe, 54pp.

Verfasser:

Robert Kirby, Ravensrodd Consultants Ltd,
6 Queens Drive, Taunton, Somerset, TA1 4XW,
United Kingdom

Dr.-Ing. Hermann Christiansen
Strom u. Hafenbau Hamburg,
Dalmannstrasse 1-3, 20457 Hamburg,
Tel.: 040 42847-3136
e-mail: Hermann.Christiansen@ht.hamburg.de